

Розробка методики оцінювання ступеня ущільнення земляного полотна за швидкістю поширення пружних хвиль

В. В. Ковальчук, І. Б. Кравець, О. С. Набоченко, А. М. Онищенко,
О. В. Федоренко, А. Я. Пенцак, О. В. Петренко, Н. О. Гембара

Проаналізовано методи оцінки технічного стану земляного полотна залізничної колії та автомобільних доріг у процесі його експлуатації. У результаті цього доведено, що питання моніторингу та контролю якісного ущільнення неоднорідного земляного полотна є актуальним і потребує розробка достовірних експериментальних методів оцінки ступеня ущільнення ґрунтів земляного полотна.

Розроблено методику лабораторного визначення ущільнення земляного полотна на основі інерційних мікрокомп'ютерних технологій, що дозволяє проводити оцінку ступеня ущільнення ґрунтів земляного полотна у залежності від швидкості поширення пружних хвиль удару.

Проведено експериментальні дослідження швидкості поширення пружних хвиль в однорідному земляному полотні із крупнозернистого піску та неоднорідному земляному полотні із крупнозернистого піску із шаром глини по середині призми. У результаті чого встановлено, що швидкість розповсюдження пружної хвилі у неоднорідному земляному полотні має нижче значення, аніж швидкість розповсюдження хвилі в однорідному земляному полотні.

При динамічній інтерпретації, із використанням дискримінантного статистичного аналізу, встановлено характерні особливості розподілу прискорень у тілі насипу однорідного та неоднорідного земляного полотна в залежності від ступеня їх ущільнення, що дозволить проводити моніторинг стану земляного полотна у процесі експлуатації. Оскільки від ступеня ущільнення ґрунту безпосередньо залежать деформаційні характеристики земляного полотна та технічного стану доріг цілому.

Ключові слова: земляне полотно, пружна хвиля удару, інерційні дослідження, швидкість поширення хвилі, щільність

1. Вступ

Розвиток залізничного транспорту в напрямку збільшення пропускнуєї спроможності та підвищення швидкостей руху поїздів, використовуючи ресурси існуючої інфраструктури, можливий лише в тому випадку, якщо виконати посилення хворих місць земляного полотна. Під час експлуатації земляного полотна, яке є основою доріг, в умовах зростання навантажень, а також несприятливого впливу природних факторів, в ньому відбувається накопичення деформацій та виникнення неоднорідностей. У залежності від характеристик ґрунтів, можуть виникати деформації земляного полотна, такі як баластні ложа, виплески, що призводить до втрати його стійкості. Тому стабільна робота залізничної колії за-

лежить від стану земляного полотна. Проте дослідженням технічного стану земляного полотна займається мала кількість науковців.

Потрібно зазначити, що при оцінці технічного стану земляного полотна виникають певні труднощі через вплив на його роботу багатьох факторів, а саме: фізико-механічних властивостей ґрунтів, вологи, вібрації, пружності, які мають властивість з часом змінюватись. Досвід експлуатації залізниць показує, що найбільшу небезпеку для руху поїздів представляють деформації земляного полотна з глинистих ґрунтів. Деформації являються довготривалими процесами і їх поверхневому виявленню передують внутрішні процеси, що знижують показники міцності ґрунтів земляного полотна і сприяють утворенню ослаблених зон і прихованих тріщин. Такі процеси проявляються у вигляді раптових деформацій.

Важливою характеристикою ґрунтів є їх щільність. Ступінь ущільнення ґрунту безпосередньо впливає на деформаційні характеристики земляного полотна. Чим вище щільність ґрунту, тим менші деформації земляного полотна. Зі збільшенням щільності зростають і характеристики опору зрушенню. У земляному полотні при вібродинамічній дії рухомого навантаження постійно відбуваються деформації, і важливо, щоб були пружними. У випадку виникнення залишкових деформацій можуть утворюватися заглиблення на основній площадці земляного полотна. У даних заглибленнях накопичується волога, яка призводить до розм'якшення глинистих ґрунтів та швидкого росту деформацій і утворення пошкоджень земляного полотна.

Для попередження раптових деформацій важливим завданням є своєчасне виявлення потенційно небезпечних для руху поїздів ділянок земляного полотна. Для цього необхідно здійснювати суцільну діагностику всіх насипів, що експлуатуються тривалий термін із залученням сучасних методів і технічних засобів.

У випадку утворення неоднорідного земляного полотна виникає проблема передчасного розладнання геометрії залізничної колії у вигляді накопичення вертикальних та горизонтальних нерівностей на колії. Це впливає на подальший термін служби елементів колії та передчасного їх виходу із експлуатації. Тому питання моніторингу та контролю якісного ущільнення неоднорідного земляного полотна є актуальним і потребує розробки експериментальної та теоретичної методики оцінки ступеня його ущільнення упродовж життєвого циклу роботи залізничної колії.

Враховуючи характер дії рухомого складу залізничного транспорту на земляне полотно, є актуальним питанням дослідження процесів у вигляді розповсюдження коливань у ньому. Процес розповсюдження пружних хвиль при дії рухомого складу залізниць у земляному полотні колії залежить від його фізико-механічних характеристик та є відображенням фактичного технічного стану колії.

Встановлення залежності між часом розповсюдження пружної хвилі при різних ущільненнях неоднорідного земляного полотна дозволить аналізувати його несучу здатність у процесі експлуатації залізничної колії.

Тому, як один із варіантів, розглянуто можливість застосування інерційних методів для оцінки технічного стану земляного полотна залізничної колії.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Щільність ґрунту в тілі земляного полотна, в шарах над трубами та на бокових сторонах засипкитрубе найважливішою характеристикою, від якої залежить їх безпечна експлуатація, яку слід контролювати. В процесі експлуатації ґрунти працюють у пружно-пластичній стадії і в них у залежності від навантажень виникають пружні або залишкові деформації. Такі процеси призводять до ущільнення або розущільнення ґрунтів [1, 2]. Таким чином щільність ґрунту безпосередньо впливає на технічний стан споруди. Нормативним документом, що регламентує вимоги до коефіцієнта ущільнення ґрунтів земляного полотна залізниць України, є [3], в якому рекомендується визначати щільність методом стандартного ущільнення.

Нормативний документ [4], регламентує визначення щільності ґрунтів трьома методами. Це наступні методи: метод стандартного ущільнення за допомогою приладу СоюздорНДІ (Україна); метод визначення максимальної щільності за Проктором та метод модифікованої щільності за Проктором. Переважно, два останніх методи застосовують у всіх країнах Європейського Союзу, США, Канади та ін. [5–7]. Суть цих методів полягає в побудові кривої ущільнення, що відображає залежність щільності сухого ґрунту від його вологості при ущільненні трамбуванням [8].

У праці [9] авторами приведено результати порівняння трьох методів визначення щільності ґрунтів, та встановлено, що найкращі показники щільності можна отримати при використанні методу визначення модифікованої щільності за Проктором. Авторами зазначено, що використання стандартного методу оцінки ущільнення ґрунту є неможливим через відсутність зсувних напружень у зразку ґрунту. Слід зазначити, що прилад стандартного ущільнення був розроблений шляхом видозміни конструкції приладу Проктора (США).

Сьогоднішні темпи будівництва [10] вимагають приладів, які швидко і достовірно можуть визначати щільність ґрунтів, оскільки існуюча методика [4] займає досить багато часу, та не дозволяє досконало перевірити щільність ґрунту на всій ділянці.

У роботі [11] для оцінки технічного стану неоднорідного перезволоженого земляного полотна залізничної колії використано георадіолокаційний метод. Проте даний метод вимагає застосування дорогого обладнання і дозволяє визначати тільки границі властивостей ґрунтового середовища земляного полотна.

Авторами [12] розроблений портативний прилад, який дає змогу автоматично визначати фактичний та асимптотичний модуль деформації ґрунту, має власний енергоносіє, забезпечує проведення вимірювань та обробку результатів в автоматичному режимі.

На світовому ринку існує велика кількість приладів для визначення штампового модуля пружності (деформації) ґрунту, шляхом динамічного випробування (падаючий вантаж). За допомогою програмного забезпечення виконується кореляція величин, що зв'язують короточасні модулі зі статичним модулем і коефіцієнтом ущільнення. Проте аналіз праць показує різноманітність всіх методів та великі затрати часу на проведення дослідження, що підкреслює актуаль-

ність розробки пристрою для визначення щільності ґрунтів земляного полотна на основі імпульсного відклику.

Дослідженнями [13] встановлено, що на характер поширення хвиль у ґрунті земляного полотна впливає його поперечний профіль та типи ґрунтових мас, що беруть участь в процесі ущільнення.

При збудженні коливань у пружному середовищі джерелом, що знаходиться поблизу поверхні, утворюються два основних види хвиль – об'ємні і поверхневі. Об'ємні хвилі в пружних твердих середовищах поширюються у вигляді двох типів коливань в залежності від напрямку зсуву частинок – поздовжні і поперечні. При проходженні поздовжньої *P*-хвилі частинки середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі, відбуваються деформації середовища. При проходженні поперечної *S*-хвилі частинки коливаються у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі, виникають деформації форми [14].

Поверхневі хвилі в залежності від площини коливання частинок поділяються на два типи – хвилі Лява і хвилі Релея. Хвилі Лява є поляризовані хвилі, в якій частинки коливаються вздовж поверхні середовища перпендикулярно напрямку поширення хвилі. Ці хвилі виникають в шаруватому середовищі в разі, коли швидкість хвилі в нижньому шарі нижче, ніж у верхньому шарі [14].

Хвилі Релея виникають поблизу вільної поверхні середовища. Коливання часток відбувається у напрямку поширення хвилі в площині, перпендикулярній поверхні [14]. Обидва зазначених типи хвиль мають дисперсію, тобто залежність фазової швидкості від частоти [13]. Глибина поширення коливань поверхневої хвилі прямо пропорційна довжині хвилі (обернено пропорційна частоті). Хвиля з високою частотою коливань швидко згасає і має невелику глибину поширення, а зменшення частоти дозволяє збільшити глибину поширення [13, 14].

В останні роки у країнах Європейського Союзу активно застосовується і розвивається метод визначення швидкостей розповсюдження поперечних хвиль, оснований на аналізі дисперсійних характеристик поверхневих хвиль [15, 16]. Даний метод був розроблений у 1983 р. і отримав назву SASW (Spectral Analysis Surface Waves – спектральний аналіз поверхневих хвиль).

До теперішнього часу було розроблено багато варіантів методу SASW, що розрізняються типом хвиль, що досліджуються, режимом проведення спостережень (активний, пасивний) і частотним діапазоном вимірювань. Рішення поставленої задачі можливе при використанні методу Монте-Карло і статистичного методу максимальної правдоподібності.

Швидкість поперечних хвиль тісно пов'язана з деформаційними характеристиками ґрунтів, такими як модуль пружності і модуль зсуву [14, 17].

Для побудови теоретичної кривої дисперсії використовуються різні методи. Відомо, що хвиля Релея має декілька форм розповсюдження (гармонік) з різними значеннями фазових швидкостей. Прогресивні методи інверсії враховують вплив вищих гармонік хвиль Релея [18]. В деяких випадках необхідно враховувати ефект об'ємних хвиль із застосуванням методів спектрального аналізу.

Метод багатоканального аналізу поверхневих хвиль (Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW) був вперше представлений в 1999 р. і опублікований в журналі Geophysics [18]. Проводиться реєстрація по-

верхневих коливань хвиль Релея від різних джерел, потім аналіз цих швидкостей і побудова профілю швидкостей поперечних хвиль.

У праці [19] використано метод багатоканального аналізу поверхневих хвиль (MASW) для вимірювання змін швидкості хвилі Релея. Швидкість хвилі Релея залежить від модуля зсуву ґрунту. Також пропонується за зміною швидкості хвиль Релея проводити моніторинг змін міцності ґрунту через певні інтервали часу.

У роботі [20] за допомогою методу інерційних вимірювань здійснено оцінку якості підбивки щебеневого шару залізничної колії. Дані дослідження виконано на однорідному щебені без включень.

У роботах [21, 22] наведено результати дослідження ступеня ущільнення баластного шару після роботи баластоущільнюючих машин різних конструкцій. Удосконалено сейсмічний метод шляхом комплексної динамічної та кінематичної інтерпретації імпульсного відклику. При динамічній інтерпретації, із використанням кластерного та дискримінантного статистичного аналізу, встановлено характерні спектральні ознаки, що відповідають ступеню ущільнення баластного шару. Натурні виміри ступеня ущільнення баластного шару після роботи різної послідовності баластоущільнюючих машин дозволили встановити ефективність ущільнення та доцільність їх застосування.

У роботі [23] виконано дослідження розподільчих властивостей баластної призми в залежності від ущільнення баластного шару динамічним навантаженням. У процесі експерименту розглядаються різні граничні умови обпирання баластного шару від повного просторового обмеження руху до вільних плеч баластної призми із природним ухилом відкосу. Поведінка баласту упродовж циклів навантаження оцінювалася за вимірами тиску в основі баластної призми вздовж осі шпали та одночасно відеоспостереженням руху частинок баласту через прозорі бокові стінки щебеневого ящика. Виміри розподілу тиску виконано за допомогою розробленої мікрокомп'ютерної системи вимірів та розроблених месдоз, які дозволяють здійснювати багатоточкові виміри напружень у комбінації із вимірами прискорень та фотограметрії. Результати вимірів показали значний вплив ущільнення баластного шару на розподіл напружень під шпалою. Виконане дослідження відкриває нові можливості практичного покращення існуючих конструкцій колії та технології підбивки і ущільнення баластного шару з точки зору забезпечення оптимальних умов роботи баластного шару.

У працях [24] виконана розробка та застосування методу визначення ущільнення баластного шару. Експериментальні дослідження показали значну зміну властивостей баласту у процесі його деформації під шпалою. У дослідженні було доведено можливість застосування багатосенсорного виміру датчиками звуку поля поширення фронту хвилі замість складного способу на основі акселерометрів. Результати вимірів показали значне локальне збільшення швидкості проходження поздовжніх хвиль у баластному шарі. Дані результати підтверджуються багатьма дослідженнями, які показують наявність зон ущільнення під шпалою.

У роботі [25] наведено лабораторні експериментальні дослідження розповсюдження пружних хвиль у залежності від величини динамічного ущільнення

щебеневого баласту залізничної колії. У результаті проведених досліджень встановлено, що значне динамічне навантаження частотою більше 30 Гц призводить до розуцільнення баласту колії, проте баластна призма стає однорідною. І швидкості поширення хвиль по довжині призми є однаковими. Також запропоновано новий теоретичний механізм розвитку нерівності колії, який враховує не тільки залишкові осідання баластного шару, а також виникнення люфтів під шпалами. Дані фактори призводить до локальної зміни пружності колії і формування зони із неоднорідним ущільненням баластного шару.

Проходження пружних хвиль через зернисте середовище визначається мінералогічним та гранулометричним складом зерен і, в значній мірі, кількістю контактів між зернами, тобто щільністю ґрунтового шару. Як показують дослідження [26], ця залежність лінійна. Таким чином, вимірюючи швидкість поширення пружних хвиль після кожного ущільнення ґрунту, можна зробити висновок про ступінь його ущільнення.

Двома важливими параметрами, які впливають на швидкість хвилі через ґрунт, є щільність та пружність (модуль зсуву). Пружність пов'язана із міцністю на зсув структурною матрицею ґрунту, на яку впливає розмір, форма, тертя і зв'язки між зернами, які складають скелет ґрунту [27]. Щільність та міцність на зсув взаємозв'язана із ступенем ущільнення, який часто виражають коефіцієнтом пористості ґрунту [19].

У роботі [28] зазначено, що із збільшенням щільності контакти між зернами ґрунту і тертя збільшується, пористість зменшується. Також встановлено, що швидкість хвилі на пряму не залежить від міцності на зсув, але розглядається як якісний показник для оцінки зміни міцності на зсув, особливо у неоднорідних ґрунтах. В крупнозернистих ґрунтах міцність на зсув і швидкість поперечної хвилі залежить від щільності зерен.

Проте із аналізу науково-дослідних робіт встановлено, що на сьогоднішній день відсутні методики визначення ущільнення неоднорідного земляного полотна залізничної колії. Вирішення даної проблеми дозволило б оцінити фактичний технічний стан земляного полотна залізничної колії, несучу здатність та механізм прогнозування подальшого розладнання геометрії колії у залежності від ступеня ущільнення земляного полотна.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розробка методики оцінювання ступеня ущільнення земляного полотна залізничної колії із використанням інерційного методу. Це дасть можливість проводити оцінку ступеня ущільнення ґрунту земляного полотна доріг.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні завдання:

- розробити лабораторну методику оцінки ступеня ущільнення однорідного та неоднорідного земляного полотна;
- провести визначення швидкості поширення пружних хвиль у земляному полотні в залежності від ступеня ущільнення ґрунту.

4. Розробка лабораторної методики оцінки ступеня ущільнення земляного полотна

Лабораторні дослідження земляного полотна склалися із послідовності циклів ущільнення ґрунтів земляного полотна та часу проходження пружних хвиль ударів. Імпульс задавався молотком через круглий штамп, поміщений по центру земляного полотна (рис. 1).



a



б



в

Рис. 1. Модель земляного полотна у лабораторному експерименті: *a* – процес ущільнення ґрунту; *б* – засипка шару глини; *в* – неоднорідне земляне полотно із крупнозернистого піску та шаром глини по середині призми

Експеримент проводили у три цикли на двох моделях. Перша модель – однорідне земляне полотно із крупнозернистого піску, друга модель – неоднорідне земляне полотно із крупнозернистого піску та шаром глини по середині призми.

Для кожної моделі земляного полотна проведено три цикли експериментальних досліджень ущільнення земляного полотна. Цикл №1 – не ущільнений стан земляного полотна; цикл №2 – проміжний стан ущільнення земляного полотна; цикл №3 –максимально пошарово ущільнений стан земляного полотна.

Після кожного циклу ущільнення проводилися вимірювання поширення пружних хвиль у земляному полотні за допомогою розробленого інерційного приладу. Для оптимального визначення щільності земляного полотна проведено вимірювання швидкості поширення пружних хвиль при п'яти ударах у кожному циклі експерименту.

В основі методу визначення ущільнення земляного полотна лежать виміри швидкості проходження пружних хвиль через ґрунтовий шар. Створення динамічних коливань та їх реєстрація здійснюється розробленими інерційним пристроєм, структурна схема якого показана на рис. 2.

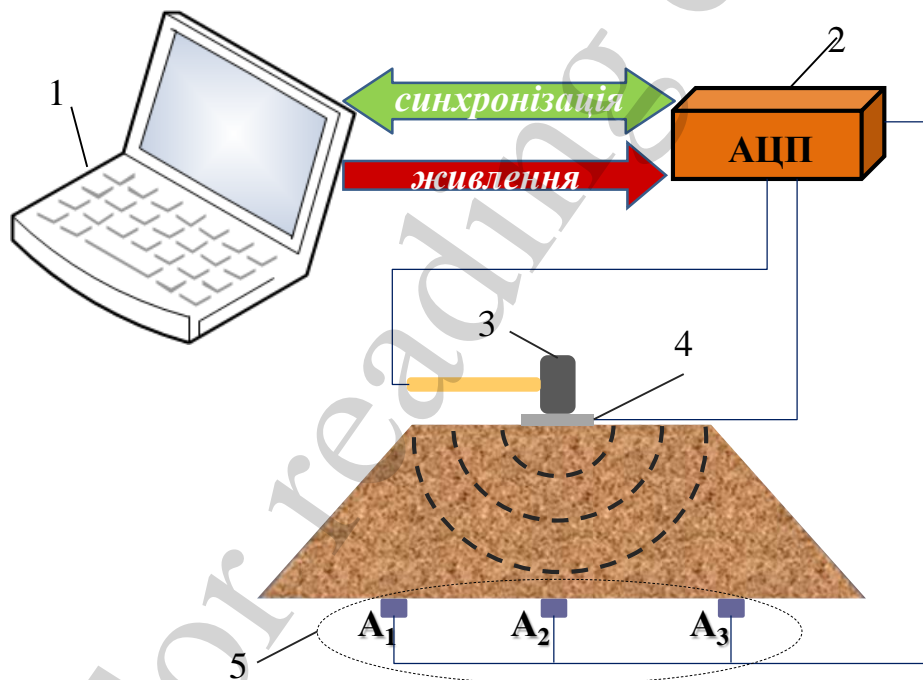


Рис. 2. Пристрій для проведення вимірювань ущільнення ґрунтів земляного полотна доріг: 1 – персональний комп'ютер, 2 – аналого-цифровий перетворювач, 3 – ударник, 4 – штамп, 5 – аналогові датчики прискорень типу ADXL 335 (Китай)

Пристрій складається із персонального комп'ютера – 1, що виконує збір даних та живлення датчиків прискорень і аналого-цифрового перетворювача. Аналого-цифровий перетворювач – 2, передає виміряні сигнали з аналогових датчиків прискорень типу ADXL 335 та ударника на персональний комп'ютер для подальшого використання та опрацювання. Всі дані з метою моніторингу стану земляного полотна накопичуються та зберігаються у пам'яті комп'ютера.

Ударник 3 та штамп 4 використовуються для створення імпульсів та сигналу замикання, за обробкою якого отримуємо час проходження хвилі від початку удару до фіксації коливання аналоговими датчиками прискорень типу ADXL 335 (Китай). Аналогова інформація сигналів прискорень поздовжніх та поперечних хвиль із 3 акселерометрів оцифровується із частотою 30 кГц та зберігається на персональному комп'ютері.

Джерелом пружних хвиль є удар молотком по металевій пластині діаметром 13 см, яка укладається на земляне полотно після кожного ступеня ущільнення. Удари відбуваються почергово, при цьому початок імпульсу фіксується за допомогою окремих цифрових каналів на аналого-цифрового перетворювача.

Для виконання динамічної інтерпретації сигналів щільності земляного полотна, запис коливаний проходження хвилі з моменту удару фіксувався за допомогою датчиків прискорень ADXL 335 (A1 до A3).

Після кожного виміру результати вимірювань прискорень записуються у файл із назвою згідно дати запису та часу роботи пристрою.

Стендом для дослідження ступеня ущільнення земляного полотна є наповнений ґрунтом скляний ящик розмірами 1,0х0,5х0,7 м (рис. 3). Ящик заповнювався ґрунтом у вигляді насипу земляного полотна без ущільнення.

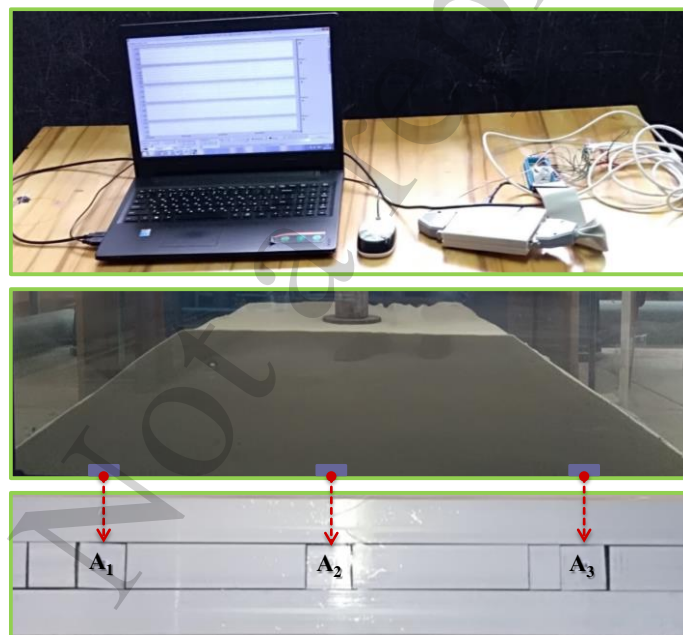


Рис. 3. Експериментальні випробовування ущільнення ґрунту земляного полотна (низ: розташування датчиків (акселерометрів) під земляним полотном, верх: вимірювальні пристрої, середина: вигляд з боку моделі земляного полотна у ящику із скляними стінками)

Дно ящика складається із п-подібних профілів, у яких розміщуються сигнальні кабелі та живлення, що йдуть до датчиків прискорень. Акселерометри поміщуються у відокремлені частини металевих профілів із розмірами ширини та довжини 40 мм і висотою 20 мм. Ці елементи відокремлюються від сусідніх датчиків та основи шумозахисним матеріалом з метою часткового виключення

побічних шумів. Загальна кількість окремих профілів із датчиками – три шт. Акселерометри на рис. 3 мають умовні позначення A_1 – A_3 .

5. Результати визначення швидкості поширення пружних хвиль у земляному полотні в залежності від ступеня ущільнення ґрунту

Аналіз часу та швидкості поширення хвиль удару проводимо при трьох станах щільності ґрунту земляного полотна та для двох різних середовищ. Таким чином, вимірюючи швидкість поширення пружних хвиль після створення імпульсу від ударника, можна зробити висновок про ступінь ущільнення ґрунту. Швидкість визначається за відомою формулою:

$$V = \frac{S}{t}, \quad (1)$$

де S – шлях проходження хвилі від ударника до акселерометра; t – час проходження хвиль удару від ударника до приймача імпульсу (акселерометра).

Відстань S визначається в залежності від товщини ґрунтового шару земляного полотна після кожного циклу ущільнення.

Схема до визначення відстані поширення пружної хвилі удару від ударника до акселерометра наведена на рис. 4. Найкоротший шлях поширення хвилі є до акселерометра A_2 , тому і час поширення хвилі повинен бути найменшим.

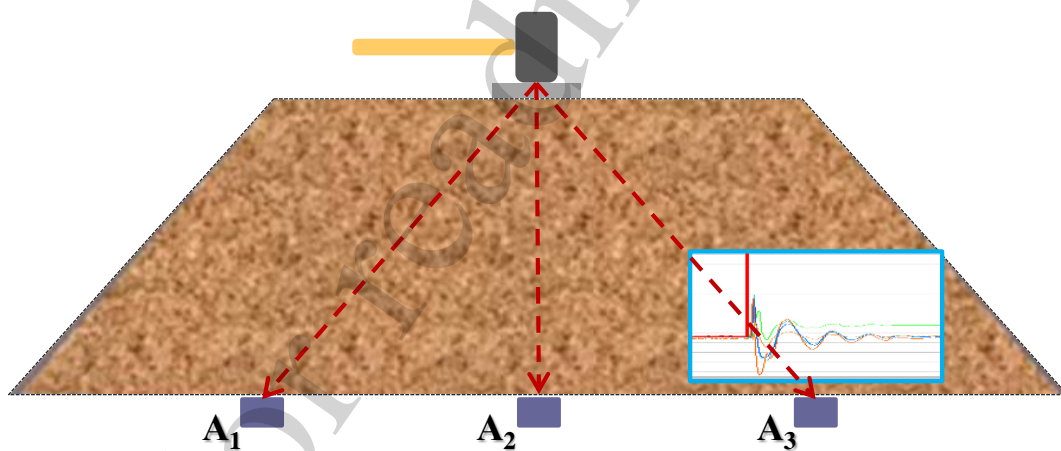


Рис. 4. Вимірювання ущільнення ґрунту земляного полотна

Далі проводиться аналіз результатів впливу ущільнення ґрунту земляного полотна на час і швидкість поширення хвиль у випадку розміщення ударника у центрі ґрунтової моделі земляного полотна.

Результати поширення часу хвиль удару від ударника до акселерометрів A_1 , A_2 , A_3 при різних циклах ущільнення однорідного земляного полотна наведено на рис. 5, а для неоднорідного на рис. 6.

Час проходження пружної хвилі удару в однорідному земляному полотні коливається у межах від 60 мс до 100 мс при неущільненому стані. При промі-

жному ущільненні земляного полотна від 50 мс до 78 мс та максимально ущільненому земляному полотні від 40 мс до 58 мс.

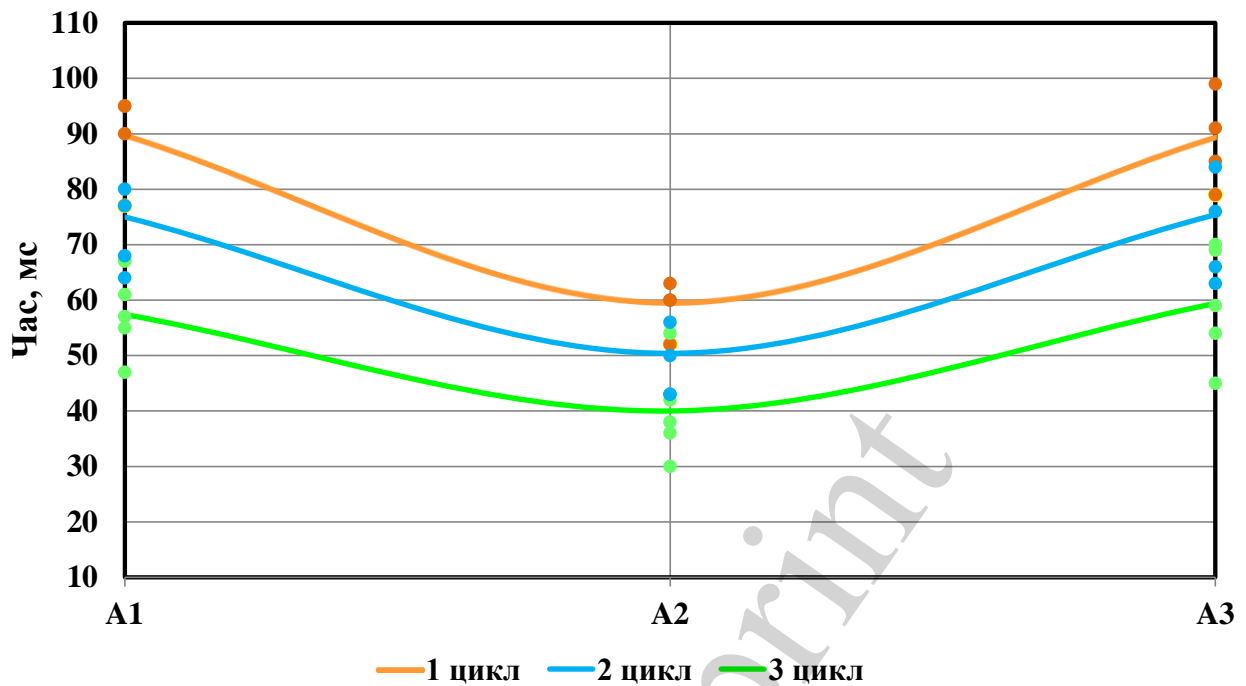


Рис. 5. Час поширення пружної хвилі удару в однорідному земляному полотні

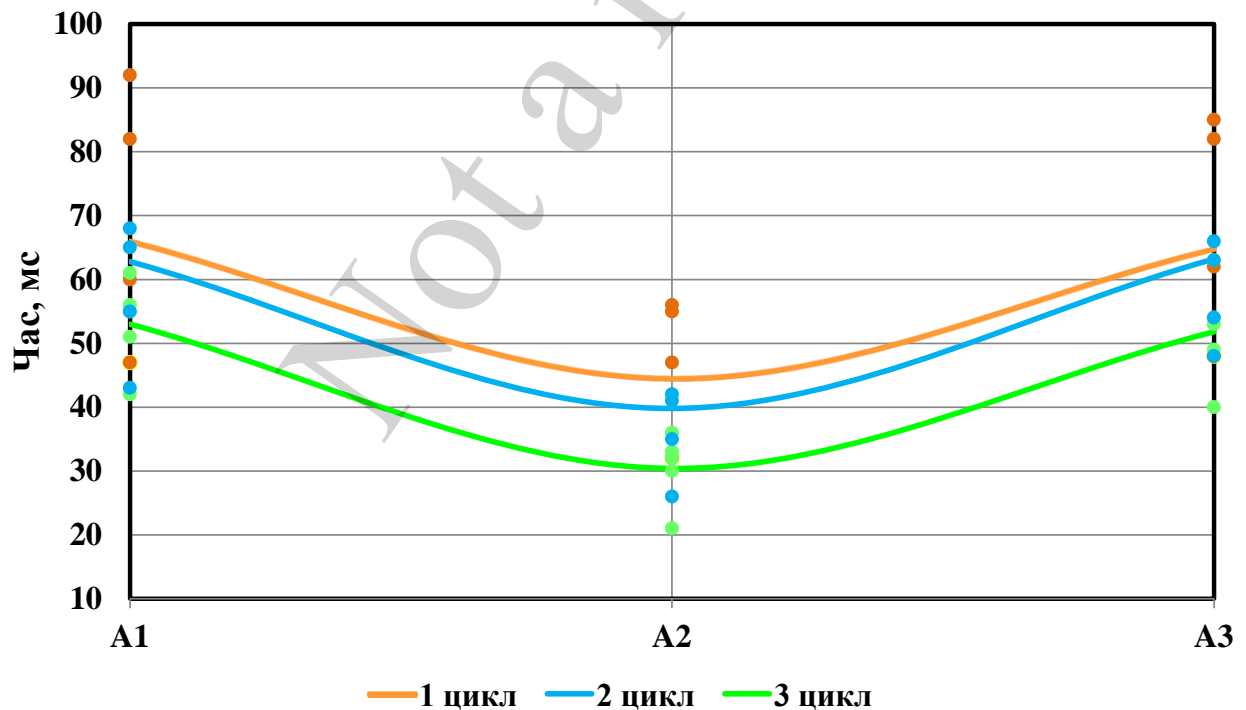


Рис. 6. Час поширення пружної хвилі удару в неоднорідному земляному полотні

У випадку неоднорідного земляного полотна час проходження пружної хвилі при неущільненому земляному полотні становить від 45 мс до 68 мс.

Припроміжному ущільненні земляного полотна від 40 мс до 65 мс та при максимально ущільненому земляному полотні від 30 мс до 53 мс.

Для датчика А2, який найближче розташований до джерела імпульсів, при розущільненому стані однорідного земляного полотна час проходження хвилі становить 59 мс. При проміжному ущільненні – 51 мс і при максимально ущільненому земляному полотні час поширення хвилі становить – 40 мс.

Час поширення пружної хвилі удару через неоднорідне земляне полотно при розущільненому стані становить 44 мс, при проміжному ущільненні – 40 мс і при максимально ущільненому – 31 мс.

На рис. 7 показано записи прискорення поздовжніх хвиль акселерометром А2 від ударника після трьох циклів ущільнення в однорідному земляному полотні, а на рис. 8 при неоднорідному земляному полотні. Також на даних графіках наведено момент початку задання імпульсу.

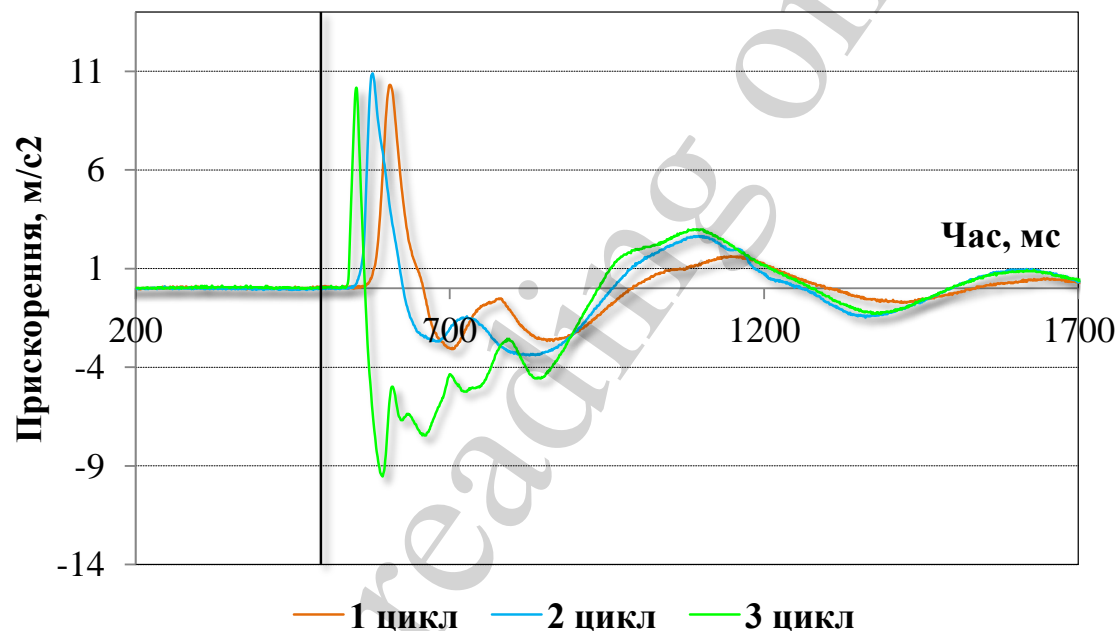


Рис. 7. Запис хвиль поширення удару в однорідному земляному полотні

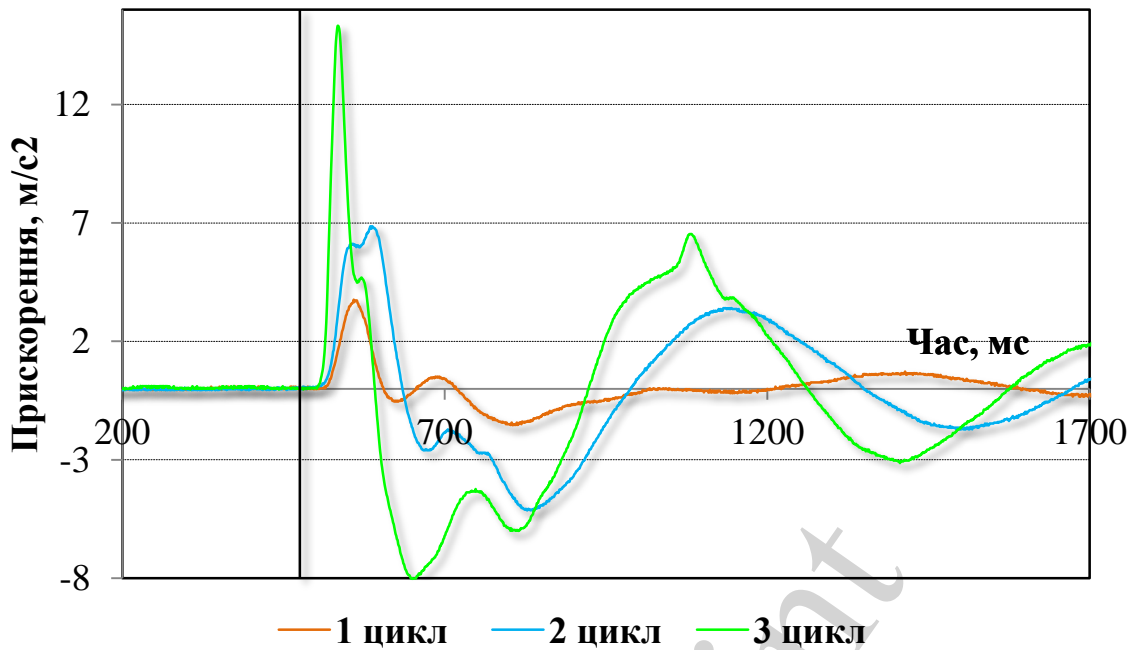


Рис. 8. Запис хвиль поширення удару в неоднорідному земляному полотні

Середній час поширення пружної хвилі удару після трьох циклів експерименту однорідного земляного полотна складає відповідно 59 мс, 51 мс та 40 мс. У неоднорідному земляному полотні – 44 мс, 40 мс та 31 мс.

У даному випадку, за записами часу проходження хвилі акселерометром із частотою 30 кГц, при найбільшому ущільненні час проходження хвилі складає 25 точок оцифрованого сигналу. Збільшення точності можна досягти шляхом збільшення частоти оцифровування сигналу прискорень.

За відомими значеннями часу поширення пружних хвиль удару та відстанню від ударника до приймаючого датчика розраховуємо швидкість поширення хвилі в однорідному земляному полотні (рис. 9) та неоднорідному земляному полотні (рис. 10).

Швидкість поширення пружної хвилі удару в неущільненому однорідному земляному полотні до акселерометра А2 становить 422 м/с, при проміжному ущільненні – 485 м/с та при максимальному пошаровому ущільненні земляного полотна – 597 м/с. Швидкість поширення хвиль до крайніх акселерометрів А1 та А3 становить 390 м/с та 386 м/с при розущільненому стані однорідного земляного полотна. При проміжному ущільненні – 458 м/с та 463 м/с відповідно і при максимально ущільненому стані – 588 м/с та 575 м/с відповідно.

У випадку неоднорідного земляного полотна швидкість поширення пружної хвилі до акселерометра А2 у розущільненому стані становить 570 м/с, при проміжному ущільненні – 588 м/с і при максимально ущільненому – 648 м/с. Швидкість поширення хвиль до крайніх акселерометрів А1 та А3 становить 553 м/с та 558 м/с при розущільненому стані земляного полотна. При проміжному ущільненні – 544 м/с та 534 м/с відповідно і при максимально ущільненому стані – 587 м/с та 605 м/с відповідно.

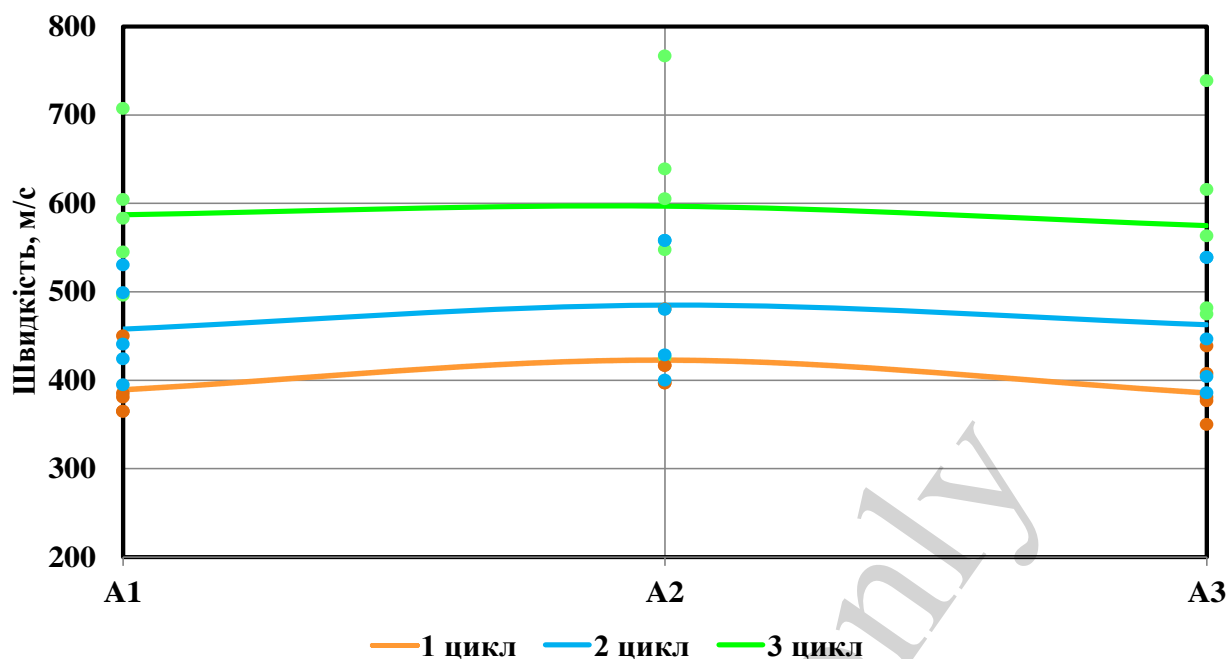


Рис. 9. Швидкість поширення пружної хвилі удару в однорідному земляному полотні

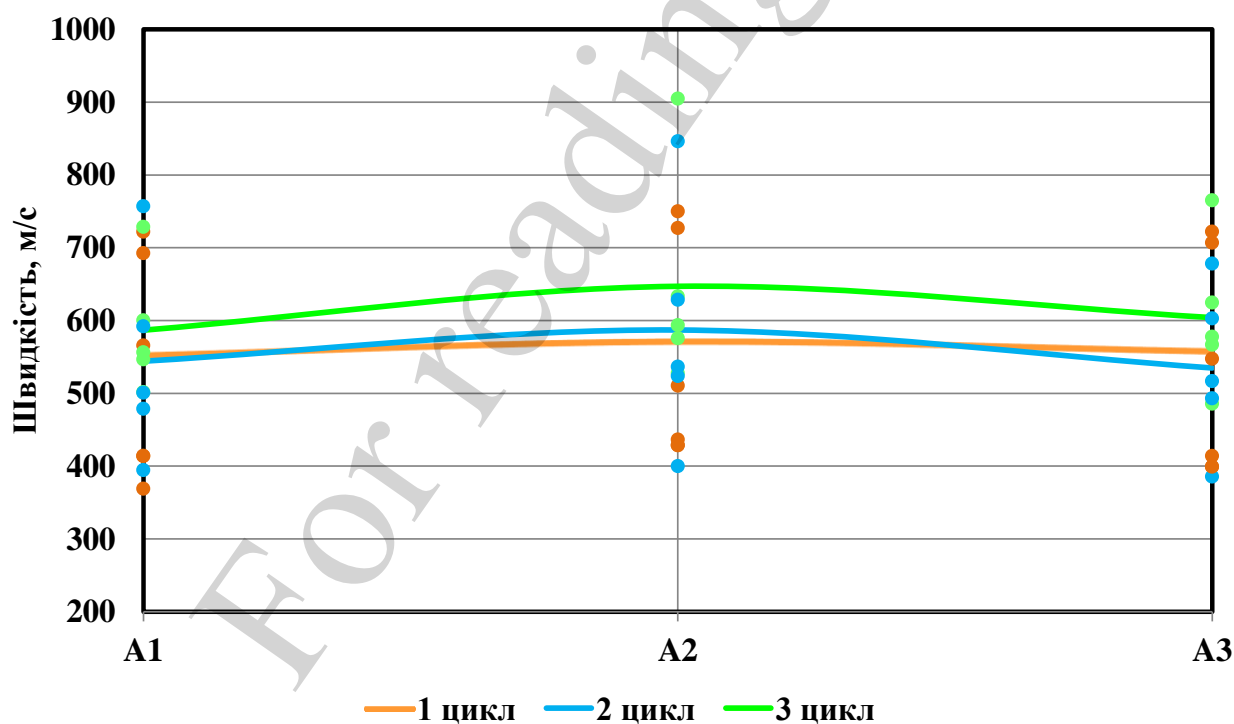


Рис. 10. Швидкість поширення пружної хвилі удару в неоднорідному земляному полотні

Отримання надійних значень швидкості поширення пружних хвиль удару в земляному полотні в залежності від його ущільнення вимагає застосування сучасних статистичних методів обробки даних. Застосування новітніх потуж-

них програмованих мікрокомп'ютерних систем з метою автоматизації статистичної обробки вимірних значень поширення пружних хвиль удару.

6. Обговорення результатів оцінки ступеня ущільнення земляного полотна залізничної колії

Якість земляного полотна, що експлуатується, на відміну від інших елементів колії, формується під час виконання ремонту. Під якістю земляного полотна розуміється найбільший ступінь його ущільнення, що відповідає найбільшій його несучій здатності та опору зміні форми, яка веде до подальшого зародження дефектів і деформацій. Знання щільності земляного полотна є важливим, оскільки цей показник дає можливість оцінити якість земляного полотна залізничної колії. Добре ущільнене земляне полотно дає можливість продовжити міжремонтний термін верхньої будови колії більш ніж на 30%.

Виконана розробка та застосування методу визначення ущільнення неоднорідного земляного полотна залізничної колії показали значну зміну поширення часу та швидкостей під час виконання програми експериментальних досліджень. З результатів визначення часу поширення пружних хвиль удару (рис. 5, 6) видно, що відношення часу проходження пружної хвилі удару через однорідне земляне полотно у неущільненому стані до часу при максимально ущільненому земляному полотні становить 1,49 рази, а при неоднорідному земляному полотні – 1,41. Це пояснюється збільшенням щільності ґрунту і відповідно зменшенням часу проходження хвиль. Тому за часом поширення хвилі удару від джерела імпульсу до приймаючого датчика можна проводити оцінку ступеня ущільнення ґрунту насипу залізничної колії.

Із проведених експериментів спостерігається значне збільшення часу проходження хвилі до бокових датчиків прискорень. Це явище пояснюється деяким розущільненням земляного полотна на бокових гранях призми.

Швидкості поширення хвиль в ґрунті змінюються в залежності від його щільності, і чим більше щільність, тим вища швидкість. Тобто, малі швидкості поширення свідчать про наявність ослабленого шару з можливим виникненням неоднорідностей.

Особливістю характеру розподілу швидкостей поширення пружних хвиль удару, на відміну від розподілу часу, є майже однакова швидкість у початковому стані. Разом із цим необхідно відмітити високий розкид вимірних швидкостей, що зростає разом із середньою величиною швидкості.

У процесі виконання досліджень розповсюдження пружних звукових хвиль у земляному полотні встановлено, що вимірювання значень швидкостей повинно змінюватися в залежності від його ущільнення у значних межах відносно до початкового ущільнення.

Методи аналізу поширення хвиль невід'ємно пов'язані із математичними методами обробки інформації, аналізу сигналів та статистики. Застосування методів машинного навчання дозволяє не тільки автоматизувати обробку та інтерпретацію даних, а також значно підвищити ступінь використання інформації та точність вимірів. Для більшої наочності використано методи кластерного та

дискримінантного аналізу для виявленням характерних ознак ущільнення земляного полотна.

Подальшим напрямком продовження теми досліджень є застосування алгоритмів комп'ютерної статистики і машинного навчання для встановлення взаємозв'язків між ущільненням земляного полотна із різних заповнюючих матеріалів та характеристиками імпульсного відклику. Застосування сучасних мікроконтролерних технологій може дати можливість розробки автономних систем моніторингу технічного стану земляного полотна на ділянках колії, що схильні до підтоплення та деформацій.

7. Висновки

1. Для проведення якісної оцінки вимірювань пружних хвиль у земляному полотні необхідно проводити просторові вимірювання. Для цього просторова роздільна здатність вимірювання щільності земляного полотна повинна не бути меншою половини товщини призми земляного полотна, тобто виміри повинні виконуватися одночасно густою мережею датчиків. Запропонований підхід оцінки ступеня ущільнення земляного полотна дозволить значно підвищити точність визначення просторового ущільнення у процесі його експлуатації, особливо на проблемних ділянках.

2. При збільшенні ущільнення земляного полотна швидкість поширення пружної звукової хвилі збільшується. Результати вимірювання швидкості поширення хвилі показують значну концентрацію локального збільшення швидкості проходження поздовжніх хвиль в однорідному та неоднорідному земляному полотні у центральній зоні. Це пояснюється більшим ступенем ущільнення центральної частини призми земляного полотна, на відміну від бокових його ділянок. У результаті численних вимірів ущільнення земляного полотна встановлено, що у недостатньо ущільненому земляному полотні сигнал значно втрачає потужність. Це видно зі значення часу проходження пружної хвилі до крайніх датчиків, які знаходяться найближче до вільного кінця призми.

Література

1. Hu, M., O'Sullivan, C., Jardine, R. R., Jiang, M. (2010). Stress-induced anisotropy in sand under cyclic loading. *Granular Matter*, 12 (5), 469–476. doi: <http://doi.org/10.1007/s10035-010-0206-7>
2. Wichtmann, T., Niemunis, A., Triantafyllidis, T. (2010). Strain accumulation in sand due to drained cyclic loading: on the effect of monotonic and cyclic preloading (Miner's rule). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (8), 736–745. doi: <http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.03.004>
3. Державні будівельні норми України. Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування. ДБН.2.3-19:2018 (2018). Київ: Мінрегіонбуд, 126. Available at: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80894
4. ДСТУ Б В.2.1-12:2009 Ґрунти. Метод лабораторного визначення максимальної щільності (2010). Київ: Мінрегіонбуд України, 9. Available at: <http://profidom.com.ua/v-2/v-2-1/1423-dstu-b-v-2-1-122009-metod-laboratornogo-viznachenna-maksimalnoji-shhilnosti>

5. DIN 18127:2012. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben. Proctorversuch (2012). Berlin: Deutsches Institut für Normung, 32. doi: <http://doi.org/10.31030/1906160>
6. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)) (2007). ASTM Standard D698. ASTM International. West Conshohocken. doi: <http://doi.org/10.1520/d0698-07e01>
7. Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)) (2009). ASTM Standard D1557. ASTM International. West Conshohocken. doi: <http://doi.org/10.1520/d1557-09>
8. Александрова, Н. П., Семенова, Т. В., Долгих, Г. В. (2015). Методы определения максимальной плотности грунтов земляного полотна автомобильных дорог. Омск: СибАДИ, 59. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24902159>
9. Панасюк Я. І., Боярчук Б. А., Талах Л. О., Процюк В. О. (2020). Визначення максимальної щільності ґрунту. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 13, 64–70. doi: [http://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2020-3\(13\)-08](http://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2020-3(13)-08)
10. Сайт проекту «Велике будівництво». Available at: <https://bigbud.kmu.gov.ua/>
11. Luchko, J., Kovalchuk, V., Kravets, I., Gajda, O., Onyshchenko, A. (2020). Determining patterns in the stressed-deformed state of the railroad track subgrade reinforced with tubular drains. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (7 (107)), 6–13. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.213525>
12. Павлюк, Д. О., Павлюк, В. В., Павлюк, В. В., Шур'яков М. В. (2012). Пристрій для автоматизованого вимірювання фактичного та асимптотичного модуля деформації ґрунтів та основ дорожніх одягів. Автошляховик України, 1, 33–37. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2012_1_11
13. Izvolt, L., Sestakova, J., Smalo, M. (2016). Analysis of results of monitoring and prediction of quality development of ballasted and ballastless track superstructure and its transition areas. Communications – Scientific Letters of the University of Zilina, 18 (4), 19–29. Available at: https://www.researchgate.net/publication/317756116_Analysis_of_results_of_monitoring_and_prediction_of_quality_development_of_ballasted_and_ballastless_track_superstructure_and_its_transition_areas
14. Antipov, V., Ofrikhter, V. (2016). Modern nondestructive method of researching of geological-engineering section. PNRPU Construction and Architecture Bulletin, 7 (2), 37–49. doi: <http://doi.org/10.15593/2224-9826/2016.2.04>
15. Catalina, O. M. (2003). Inversion method for spectral analysis of surface waves (SASW). Institute of Technology, 287. Available at: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/5124>
16. Sussmann, T. R., Thompson, H. B., Stark, T. D., Wilk, S. T., Ho, C. L. (2017). Use of seismic surface wave testing to assess track substructure condition. Construction and Building Materials, 155, 1250–1255. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.077>

17. Suto, K. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) for investigation of ground competence: an introduction. *Engineering Advances in Earthworks*. Australian Geomechanics Society, 71–81.
18. Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64 (3), 800–808. doi: <http://doi.org/10.1190/1.1444590>
19. Dashwood, B., Gunn, D., Curioni, G., Inauen, C., Swift, R., Chapman, D. et. al. (2020). Surface wave surveys for imaging ground property changes due to a leaking water pipe. *Journal of Applied Geophysics*, 174, 103923. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103923>
20. Przybylowicz, M., Sysyn, M., Kovalchuk, V., Nabochenko, O., Parneta, B. (2020). Experimental and theoretical evaluation of side tamping method for ballasted railway track maintenance. *Transport Problems*, 15 (3), 93–106. doi: <http://doi.org/10.21307/tp-2020-036>
21. Sysyn, M., Nabochenko, O., Kovalchuk, V., Gerber, U. (2019). Evaluation of railway ballast layer consolidation after maintenance works. *Acta Polytechnica*, 59 (1), 77–87. doi: <http://doi.org/10.14311/ap.2019.59.0077>
22. Sysyn, M., Gerber, U., Kovalchuk, V., Nabochenko, O. (2018). The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works. *Archives of Transport*, 47 (3), 91–107. doi: <http://doi.org/10.5604/01.3001.0012.6512>
23. Sysyn, M., Kovalchuk, V., Nabochenko, O., Kovalchuk, Y., Voznyak, O. (2019). Experimental Study of Railway Trackbed Pressure Distribution Under Dynamic Loading. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 14 (4), 504–520. doi: <http://doi.org/10.7250/bjrbe.2019-14.455>
24. Sysyn, M., Kovalchuk, V., Gerber, U., Nabochenko, O., Parneta, B. (2019). Laboratory Evaluation of Railway Ballast Consolidation by the Non-Destructive Testing. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 21 (2), 81–88. doi: <http://doi.org/10.26552/com.c.2019.2.81-88>
25. Sysyn, M., Kovalchuk, V., Gerber, U., Nabochenko, O., Pentsak, A. (2020). Experimental study of railway ballast consolidation inhomogeneity under vibration loading. *Pollack Periodica*, 15 (1), 27–36. doi: <http://doi.org/10.1556/606.2020.15.1.3>
26. Ляховицкий, Ф. М., Хмелевской, В. К., Яценко, З. Г. (1989). Инженерная геофизика. Москва: Недра, 254.
27. Donohue, S., Long, M. (2010). Assessment of sample quality in soft clay using shear wave velocity and suction measurements. *Géotechnique*, 60 (11), 883–889. doi: <http://doi.org/10.1680/geot.8.t.007.3741>
28. Gunn, D., Dashwood, B. A. J., Bergamo, P., Donohue, S. (2016). Aged embankment imaging and assessment using surface waves. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Forensic Engineering*, 169 (4), 149–165. doi: <http://doi.org/10.1680/jfoen.16.00022>